第 38 卷第 5 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.38, No.5
2017 年 5 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS May, 2017

爪式真空泵新型全光滑转子及其性能研究

王 君 庞晓峰 刘宏杰 崔 冬 崔 锋

(中国石油大学 (华东) 化学工程学院，青岛 266580)

摘 要 针对爪式真空泵现有的爪式转子型线存在不光滑连接点的缺陷，本文提出了一种新型全光滑的爪式转子，其转子型线由 6 段圆弧和 3 段摆线的等距曲线组成，且能够实现正确的啮合；得到了其生成方法和型线方程。通过对其工作过程进行三维数值模拟，分析了全光滑爪式转子内部流场的变化规律，并与现有的爪式转子进行性能对比。研究结果表明：所提出的爪式转子具有啮合性能好、余隙容积小、力学性能好等优点。

关键词 爪式真空泵；爪式转子；全光滑型线；数值模拟

中图分类号：TH36 **文献标识码**：A **文章编号**：0253–231X(2017)05–1007–05

Investigation of a Novel Perfect Smooth Profile of Claw Rotors and Its Performances for Claw Vacuum Pumps

WANG Jun PANG Xiao-Feng LIU Hong-Jie CUI Dong CUI Feng

(*College of Chemical Engineering, China University of Petroleum* (*Huadong*), *Qingdao* 266580, *China*)

Abstract In view of the problems that the existing claw rotor profiles contain non-smooth connection points of claw vacuum pumps, a novel perfect smooth profile of the claw rotor is proposed in this paper. The proposed perfect smooth profile, which can achieve correct meshing, is composed of 6 circular arcs and 3 equidistant curves of cycloid, and its generating methods as well as profile equations are obtained. 3D numerical simulations of the proposed claw rotors in the working process are conducted, the change rules of flow fields are analyzed, and their performances are compared with the existing claw rotor. The study results show that the proposed claw rotor profile has remarkable advantages of better meshing performance, smaller clearance volume and better mechanical properties.

Key words claw vacuum pump; claw rotor; perfect smooth profile; numerical simulation

0 引 言

爪式真空泵 [1−2] 属于容积式真空泵，由两个形状相同且相互啮合的爪式转子做同步异向双回转运动，使工作腔容积发生周期性变化，完成吸气、压缩和排气的循环过程；具有结构简单、干式无油、运行平稳等显著优点，广泛应用于石油石化、航空航天、医疗器械等领域。目前在对爪式真空泵的研究中，文献 [2]~[5] 研究了转子型线参数的变化对爪式转子的影响，对比了不同爪型在力学性能方面的差异；文献 [6]~[8] 对爪式转子型线进行了优化，且对爪式真空泵特有的混合过程进行了分析研究；文献 [9]~[10] 采用动网格技术研究了爪式真空泵内部流场的变化规律。

现有的几种爪式转子都存在尖点或不光滑点，在尖点或不光滑点处易发生磨损、变形，导致转子的力学性能差、密封性能差。针对这一问题，本文提出了一种新型全光滑的爪式转子，实现了爪式转子型线之间的全部光滑连接、实现了在工作中转子型线间的正确啮合，提高了爪式转子的力学性能和密封性能，丰富了爪式转子的类型，对爪式真空泵的发展具有重要的意义。

1 现有的爪式转子型线

如图 1 所示，爪式真空泵现有的转子型线存在 4 个尖点 b、c、d、e；在尖点处很容易发生磨损、变形以及应力集中；并且爪式真空泵的密封性能完全依赖于两个转子型线之间的啮合，而尖点与曲线之间的啮合存在很大的泄漏隐患；以及该类型的转子在特有的混合过程中会出现局部高压的问题。因此，这些尖点对爪式真空泵的工作效率和工作寿命都有着非常不利的影响。

收稿日期：2017-01-16; **修订日期**：2017-04-17
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.16CX05007A)；中国石油大学 (华东) 研究生创新工程 (No.YCXJ2016043)
作者简介：王 君 (1976–)，男，副教授，博士，主要从事流体机械研究，Email：wangjun@upc.edu.cn

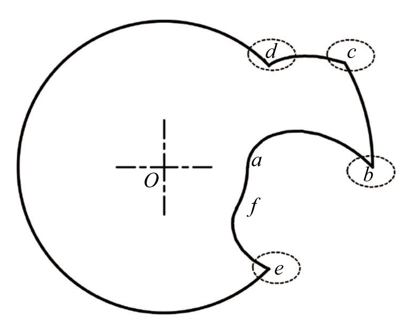


图 1 现有的爪式转子型线
Fig. 1 The existing claw rotor profile

2 新型全光滑爪式转子

2.1 爪式转子的型线方程

所提出的全光滑爪式转子的型线如图 2 所示，由 6 段圆弧和 3 段摆线的等距曲线构成，包括：节圆圆弧 FG、底爪尖圆弧 GH、摆线的等距曲线 HI、爪底圆弧 IA、摆线的等距曲线 AB、前爪尖圆弧 BC、爪顶圆弧 CD、后爪尖圆弧 DE 和摆线的等距曲线 EF。采用圆的纯滚动方法构建出全光滑爪式转子的新型线，并且求得新型线的具体方程。

长幅外摆线的等距曲线 AB 的方程为：

$$\begin{cases} x=2R_2\cos t-(R_1-R_4)\cos 2t- \\ R_4\cdot\dfrac{2(R_1-R_4)\cos 2t-2R_2\cos t}{\sqrt{[2(R_1-R_4)]^2-8(R_1-R_4)R_2\cdot\cos t+4R_2^2}} \\ y=2R_2\sin t-(R_1-R_4)\sin 2t- \\ R_4\cdot\dfrac{2(R_1-R_4)\sin 2t-2R_2\sin t}{\sqrt{[2(R_1-R_4)]^2-8(R_1-R_4)R_2\cdot\cos t+4R_2^2}} \end{cases} \quad (1)$$

短幅外摆线的等距曲线 EF 的方程为：

$$\begin{cases} x=2R_2\cos t-(R_2-R_5)\cos 2t+ \\ R_5\cdot\dfrac{2(R_2-R_5)\cos 2t-2R_2\cos t}{\sqrt{[2(R_2-R_5)]^2-8(R_2-R_5)R_2\cdot\cos t+4R_2^2}} \\ y=2R_2\sin t-(R_2-R_5)\sin 2t+ \\ R_5\cdot\dfrac{2(R_2-R_5)\sin 2t-2R_2\sin t}{\sqrt{[2(R_2-R_5)]^2-8(R_2-R_5)R_2\cdot\cos t+4R_2^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中，t 为角度参数，rad；R_1 为爪顶圆弧半径，mm；R_2 为节圆圆弧半径，mm；R_3 为爪底圆弧半径，mm；R_4 为顶爪尖圆弧半径，mm；R_5 为底爪尖圆弧半径，mm。

2.2 爪式转子的生成方法

1) 如图 2 所示，将 AB 所在的长幅外摆线的等距曲线向外侧等距偏移 R_4，与半径为 R_1-R_4 的圆相交，以其交点为圆心作半径为 R_4 的圆，与长幅外摆线的等距曲线 AB 相切于 B 点，与爪顶圆弧 CD 相切于 C 点，得到圆弧 BC，并且将半径为 R_4 的圆逆时针旋转 α_1 角度与爪顶圆弧 CD 相切于 D 点；

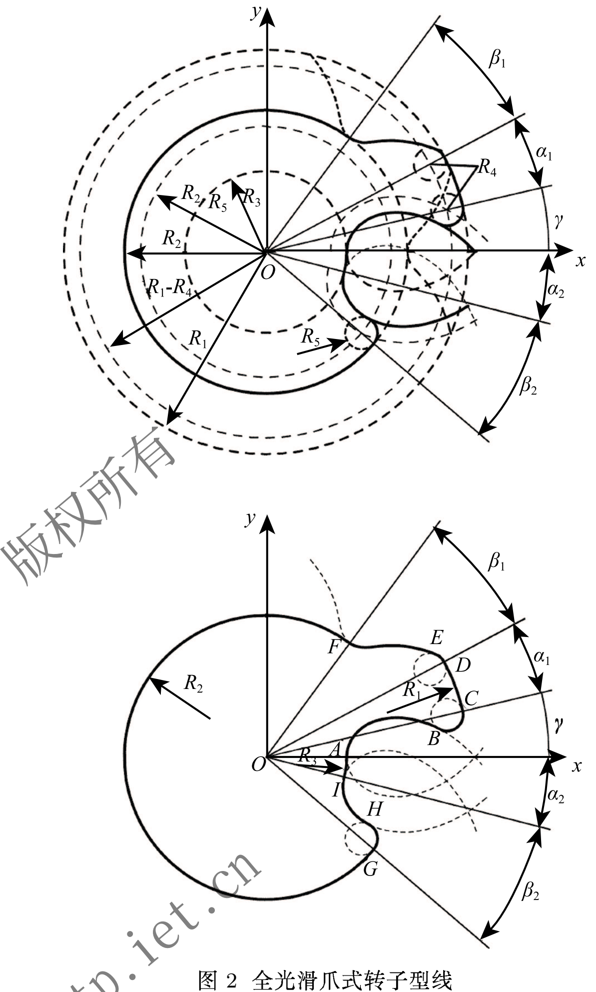


图 2 全光滑爪式转子型线
Fig. 2 Perfect smooth claw rotor profiles

2) 将长幅外摆线的等距曲线 AB 所在的曲线顺时针旋转 α_2 角度，得到长幅外摆线的等距曲线 HI；

3) 将长幅外摆线的等距曲线 HI 向外侧等距偏移 R_5，与半径为 R_2-R_5 的圆相交，以其交点为圆心作半径为 R_5 的圆，与长幅外摆线的等距曲线 HI 相切于 H 点，与节圆相切于 G 点，得到圆弧 GH；

4) 将 EF 所在的短幅内摆线的等距曲线逆时针旋转 $\alpha_1+\beta_1+\gamma$ 角度，与节圆相切于 F 点，与半径为 R_4 的圆相切于 E 点，得到短幅内摆线的等距曲线 EF；最后通过对多余曲线进行修剪得到全光滑爪式转子。

2.3 爪式转子的几何参数

在爪式转子的构建过程中，已知独立的几何参数就可以构建出整个转子的型线图。如图 2 所示，全光滑转子全部的齿形参数有：爪顶圆弧半径 R_1，节

圆圆弧半径 R_2，爪底圆弧半径 R_3，中心角 γ，顶爪尖圆弧半径 R_4，底爪尖圆弧半径 R_5，爪顶圆弧角 α_1，爪底圆弧角 α_2，旋转角 β_1 和旋转角 β_2。在以上的参数中存在如下关系：

$$\alpha_1 = \alpha_2 \tag{3}$$

$$\beta_1 = \beta_2 \tag{4}$$

$$2R_2 = R_1 + R_3 \tag{5}$$

其中，独立的几何参数有 5 个，分别为：爪顶圆弧角 α_1，爪顶圆弧半径 R_1，爪底圆弧半径 R_3，顶爪尖圆弧半径 R_4，底爪尖圆弧半径 R_5。其余参数如中心角 γ，旋转角 β_1 和旋转角 β_2，可根据其生成方法求得。

2.4 爪式转子型线的啮合关系

新型爪式转子在工作中实现了爪式型线之间的正确啮合，改善了现有爪式转子型线存在尖点的缺陷。如图 3 所示，转子型线的啮合关系为：左侧转子的长幅外摆线的等距曲线 AB、前爪尖圆弧 BC、爪顶圆弧 CD、后爪尖圆弧 DE、短幅外摆线的等距曲线 EF、节圆圆弧 FG、底爪尖圆弧 GH、长幅外摆线的等距曲线 HI、爪底圆弧 IA，分别与右侧转子中的前爪尖圆弧 bc、长幅外摆线的等距曲线 ab、爪底圆弧 ia、长幅外摆线的等距曲线 hi、底爪尖圆弧 gh、节圆圆弧 fg、短幅外摆线的等距曲线 ef、后爪尖圆弧 de、爪顶圆弧 cd 相啮合。

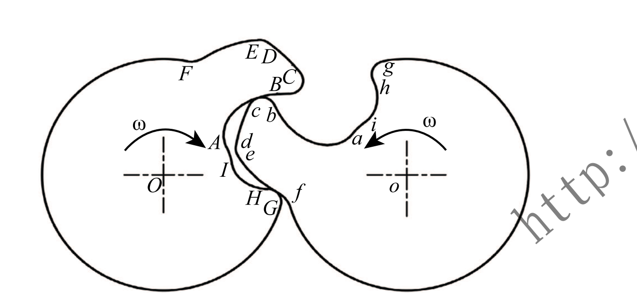


图 3 全光滑爪式转子的啮合
Fig. 3 Meshing between perfect smooth claw rotors

2.5 爪式真空泵的工作过程

如图 4 所示，一对相互啮合的爪式转子与机壳形成两个工作腔：工作腔 I 和工作腔 II，两个转子做同步异向双回转运动，使工作腔容积发生周期性的变化，完成吸气、压缩、排气和混合过程的工作过程。图 4(a) 中工作腔 I 为吸气过程开始，工作腔 II 为压缩过程开始；图 4(b) 中工作腔 I 为吸气过程中，工作腔 II 为压缩过程结束、排气过程开始；图 4(c) 中工作腔 I 为吸气过程结束，工作腔 II 为排气过程结束，其阴影部分称之为余隙容积，工作腔 I 和工作腔 II 即将进入混合过程。

所提出的全光滑爪式转子在混合过程中，具有能够避免局部高压的优点；如图 4(d) 所示，余隙容积，即工作容积腔 II 中的气体直接与工作腔 I 相连通，避免了局部高压。

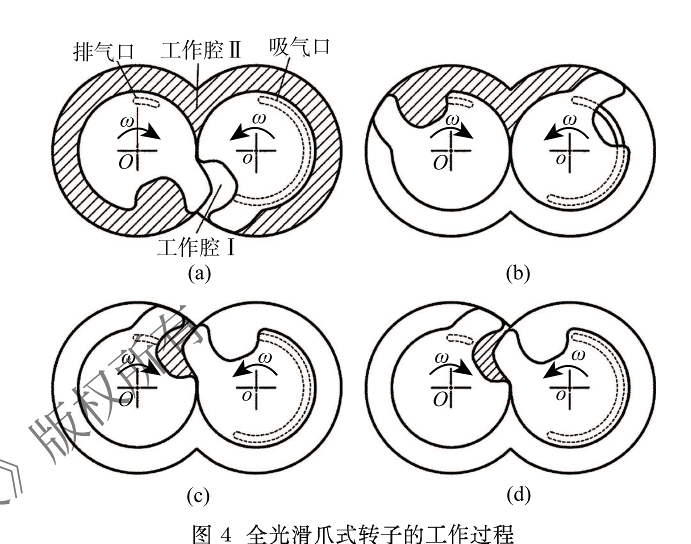


图 4 全光滑爪式转子的工作过程
Fig. 4 Working process of perfect smooth claw rotor

3 全光滑爪式真空泵的工作过程模拟

3.1 网格的划分

全光滑爪式转子的几何参数：爪顶圆弧角 α_1=15°，爪顶圆弧半径 R_1=50 mm，爪底圆弧半径 R_3=20 mm，顶爪尖圆弧半径 R_4=4 mm，底爪尖圆弧半径 R_5=4 mm。

采用三维非结构化四面体网格对全光滑爪式真空泵的流体区域进行网格划分；首先对转子与泵壳体构成的流体区域进行网格划分，如图 5 所示，体网格大小为 0.6 mm，啮合间隙 0.06 mm，生成的转子流体区域总网格数量为 456662，即动网格 (参与网格重构) 的数量；其次对吸气口与转子端面之间的流体区域进行网格划分，通过对以上三部分流体区域网格的融合，得到整个模型的网格结构图。



图 5 非结构化动网格
Fig. 5 Unstructure dynamic meshes

3.2 求解模型的设置

在 Fluent 中选择耦合隐式求解方法、非定常流动、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型，边界条件设置为压力入口和压力出口；入口压力为 25400 Pa，温度为 293 K；出口压力为 1×10^5 Pa，工作介质为空气。

3.3 模拟结果

3.3.1 压力场

工作过程中工作腔的压力场如图 6 所示，图 6(a) 中工作腔处于吸气和压缩过程，吸气过程为等压过程；压缩过程中气体压力升高较慢，其压力值低于理论绝热压缩过程，这是由于转子端面间隙处和转子啮合间隙处存在泄漏的缘故；图 6(b) 中工作腔处于排气过程，排气过程为等压过程；图 6(c) 中工作腔处于混合过程，混合过程中整个工作腔中的压力波动较小，不存在局部高压。

3.3.2 速度场

工作过程中，气体通过间隙从高压腔向低压腔进行泄漏，泄漏间隙有：爪顶圆弧与气缸壁之间的啮合间隙、转子之间的啮合间隙、转子端面与气缸端面的间隙。

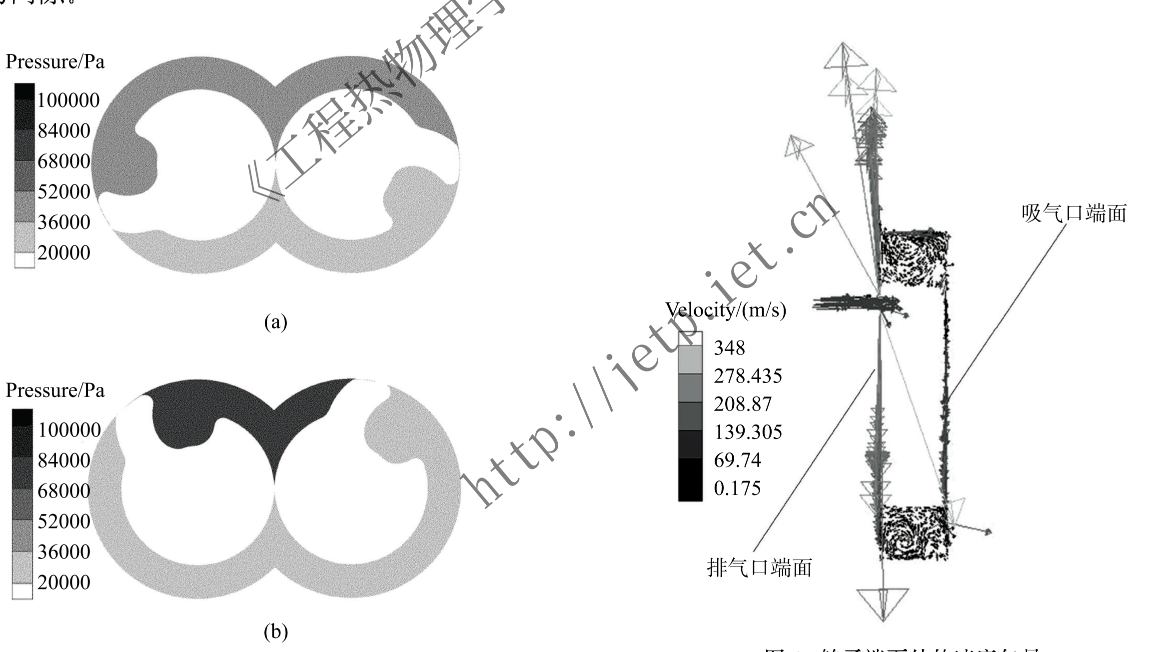


图 6 工作腔的压力场
Fig. 6 Pressure fields of working chambers

啮合间隙处的速度矢量如图 7 所示，两个工作腔分别处于吸气、压缩过程。可见在两个转子啮合间隙处的速度矢量最大，表明爪式真空泵内部的泄漏主要发生在两个转子之间的啮合处。

转子端面与气缸端面间隙处的速度矢量如图 8 所示，在转子端面与气缸壁之间的两处间隙内都有气体泄漏；但排气口所在端面的速度矢量比吸气口所在端面的速度矢量大，表明爪式真空泵在端面处的泄漏主要发生在排气口所在端面。

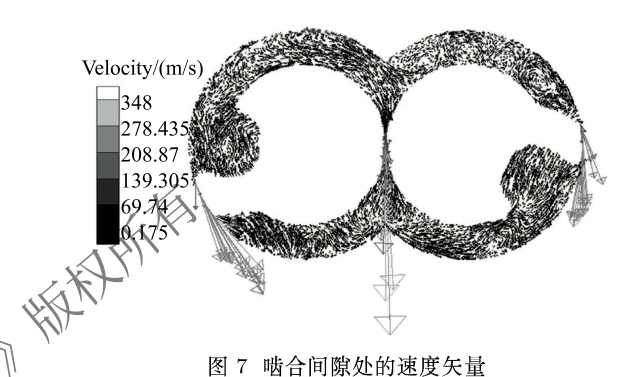


图 7 啮合间隙处的速度矢量
Fig. 7 Velocity vector of meshing clearances

图 8 转子端面处的速度矢量
Fig. 8 Velocity vector of the end clearances

3.4 模拟结果对比

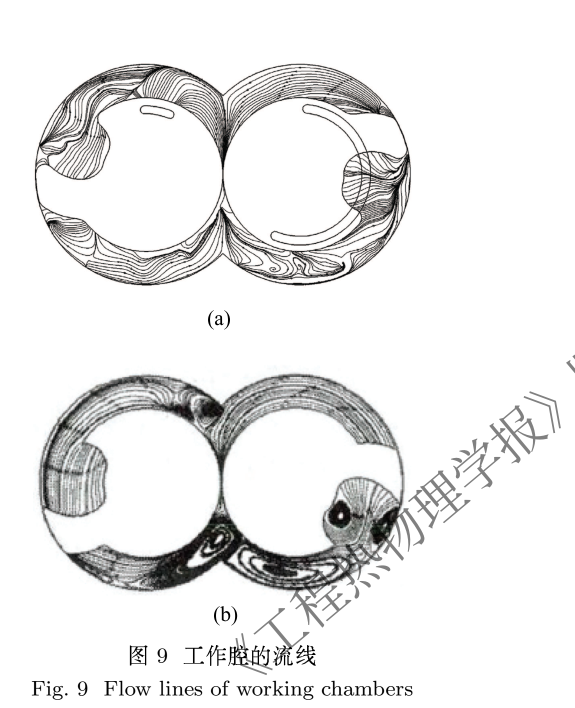
3.4.1 流线对比

如图 9 所示为爪式真空泵工作腔内部流线的对比图，图 9(a) 为全光滑爪式转子流线图，图 9(b) 为现有的曲爪转子流线图。可见新型全光滑爪式转子的工作腔内部产生的旋涡较少，表明新型转子消除了转子的尖点后，能够使其内部流线更加平滑规则，

减小工作腔内的流动损失。

3.4.2 压力场对比

如图 10 所示，为现有的爪式转子在混合过程中的压力场，图 6(c) 为全光滑转子在混合过程中的压力场，两者相比，现有的爪式转子在混合过程中存在局部高压，而全光滑爪式转子则不会产生局部高压，并且全光滑转子能够降低真空泵的功耗以及改善对液体的敏感性。



(a)

(b)

图 9 工作腔的流线

Fig. 9 Flow lines of working chambers

Pressure/Pa
400000
324000
248000
172000
96000
20000

图 10 混合过程中的压力场

Fig. 10 Pressure field in the mixing process

4 结　论

1) 针对现有爪式转子存在尖点的缺陷，提出一种新型全光滑爪式转子，转子型线由 6 段圆弧和 3 段摆线的等距曲线组成，得到了全光滑的爪式转子型线，并实现了转子型线之间的正确啮合，提高了爪式转子的密封性能和力学性能。

2) 通过对全光滑爪式真空泵的三维数值模拟，分析了爪式转子内部流场的变化规律；由于气体的泄漏，爪式真空泵在压缩过程中，气体增压过程较平缓；并且内部泄漏主要发生在两个转子的啮合间隙处、排气口所在的端面间隙处。

3) 通过对比全光滑转子和现有爪式转子在工作过程中的流线图和压力变化图，表明：全光滑转子工作腔内部的流线更加平滑规则，全光滑爪式转子在混合过程中不存在局部高压，能够减小真空泵的功耗，并改善对液体的敏感性。

参 考 文 献

[1] 杨乃恒. 干式真空泵的原理、特征及其应用 [J]. 真空，2000, 15(3): 1–9
Yang Naiheng. Principle Characteristics of Dry Vacuum Pump and its Applications [J]. Vacuum, 2000, 15(3): 1–9

[2] WANG Jun, JIANG Xitong, CAI Yaomin. Investigation of a Novel Circular Arc Claw Rotor Profile for Claw Vacuum Pumps and its Performance Analysis [J]. Vacuum, 2015, 111: 102–109

[3] 姜希彤. 爪式流体机械的转子型线与热力过程研究 [D]. 青岛：中国石油大学 (华东), 2015
JIANG Xitong. The Research of Rotor Profile and Thermodynamic Process for claw Type Fluid Machinery [D]. Qingdao: China University of Petroleum (Huadong), 2015

[4] 姚民生. 爪型泵型线的研究 [J]. 真空，1989(03): 9–14
Yao Minsheng.Study on Profile of Claw Type Vacuum Pumps [J]. Vacuum, 1989(03): 9–14

[5] 徐学忠，谭翰墨，刘建花. 特殊爪型真空泵转子型线的研究 [J]. 机床与液压，2013, 41(5): 81–84
XU Xuezhong, Tan Hanmo, Liu Jianhua. Study on Rotor Profile of the Special Claw Type Vacuum Pump [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(5): 81–84

[6] WANG Jun, SONG Yongxing, JIANG Xitong. An Analytical Model of Claw Rotor Profiles and Working Process Model with the Mixing Process for Claw Vacuum Pumps [J]. Vacuum, 2015, 114: 66–77

[7] Hsieh C F. A Study of the Geometric Design and Gas Port of the Claw-type Rotor, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(9): 2063–2069

[8] Giuffrida A. Adding the Teaching of Claw Rotor Compressors to Fluid Machinery Courses. International Journal of Mechanical Engineering Education. 2012, 39(1): 1–16

[9] 王君，刘凯，姜希彤，等. 爪式流体机械工作过程特性研究 [J]. 流体机械，2012, 40(12): 39–43
WANG Jun, LIU Kai, JIANG Xitong, et al. Research on Working Process Characteristic of Claw Type Fluid Machinery [J]. Fluid Machinery. 2012, 40(12): 39–43

[10] 王君，姜希彤，刘凯，等. 爪式流体机械工作过程的三维数值模拟 [J]. 工程热物理学报，2014, 35(2): 270–273
WANG Jun, JIANG Xitong, LIU Kai, et al. 3D Numerical Simulation of the Working Process of Claw Type Fluid Machinery [J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2014, 35(2): 270–273